

운송시간을 고려한 생산-분배계획을 위한 최적화모델

임석진* · 정석재**

*인덕대학 산업시스템경영과 · **연세대학교 정보산업공학과

An Optimization Model for an Production-Distribution Planning with Consideration of a Transportation Time

Seok Jin Lim* · Suk Jae Jeong**

*Department of Technology Industrial System Engineering, Induk Institute

**Department of Industrial System Engineering, Yonsei University

Abstract

Recently, a multi-facility, multi-product and multi-period industrial production-distribution planning problem has been widely investigated in Supply Chain Management(SCM). One of the key issues in the current SCM research area involves reducing both production and distribution costs. We have developed an optimization model to tackle the above problems under the restricted conditions such as transportation time and a zero inventory. Computational experiments using commercial tool Ms-Excel Solver show that the real size problems we encountered can be solved in reasonable time. The model can be used to decide an appropriate production-distribution planning problem in SCM research area.

Keywords : Production-distribution planning, Optimization model, SCM

1. 서론

오늘날 시장환경이 글로벌화 되고 제품과 서비스에 관련된 소비자의 요구가 다양화되어짐에 따라 기업이 시장에서 경쟁력을 갖추기 위해선 이러한 변화에 능동적으로 대처해야 하는 환경을 요구하고 있다. 시장의 확대와 생산성 향상 그리고 최상의 품질의 제품을 적시에 공급 받고자 하는 고객의 요구에 효과적으로 대처하기 위해 생산기술의 개발, 생산기지의 국외이전, 생산공장의 지방으로의 분산과 같은 생산/분배네트워크의 설계와 구축 그리고 이를 효율적으로 운용하기 위한 여러 방법들이 연구되고 있다.

공급사슬관리(Supply Chain Management)에서는 원재료 구매에서부터 고객에게 분배하기까지의 모든 활동을 하나의 연속된 흐름과정으로 인식하고 있다. 따라서 효율적으로 운영되고 있는 시스템인지를 평가하는 중요한 요

소로 제품을 생산하는데 소요되는 생산비용과 원재료와 제품을 보관하는데 소요되는 재고비용, 공급자에서 생산공장으로 또한, 생산공장에서 수요자에게 원재료나 제품을 운송하는데 소요되는 운송비용 등이 고려되고 이를 효과적으로 관리하기 위한 다양한 연구가 진행되었다. 공급사슬관리도입 이전의 연구들은 재고관리, 생산계획 및 통제, 수송계획 등 각 활동에서의 최적화에 초점을 맞춰 연구되었다. 하지만 공급사슬관리의 도입에 따라 원자재의 공급, 재고, 생산, 분배 등을 연속된 흐름으로 보고 상호연관성을 가진 통합된 분야로 인식하여 전체시스템에서의 효율성과 최적화를 위한 연구가 진행되고 있다.

즉 원재료부터 고객에 이르기까지의 전과정을 공급사슬(Supply Chain)이라 하며, 각 부문들 사이의 물류, 정보, 자금의 흐름을 총체적으로 관리하여 공급사슬의 효율을 증가시키는 전략에 관한 연구이다. (Thomas and Griffin, 1996).

† 본 연구는 인덕대학 학술연구비 일부지원에 의해서 수행되었음.

† 교신저자: 임석진, 서울시 노원구 월계4동 산76 인덕대학 산업시스템공학과

M · P: 011-314-5448, E-mail: bigteach@induk.ac.kr

2008년 1월 접수; 2008년 2월 수정본 접수; 2008년 2월 게재확정

2. 이론적 배경 및 선행연구

다음은 본 연구와 관련된 선행연구에 대하여 소개한다. Erengüç(1999) 등은 supply chain 분야에 있어서 통합화된 production/distribution planning에 대한 연구들을 supplier stage, plant stage, distribution stage로 분류하여 소개하였다. Chandra 와 Fisher(1994)는 single production facility, multi-product에서 고정비용, 재고비용, 운송비용을 최소화하기 위한 production scheduling과 vehicle routing문제를 연구를 수행하였다.

Flipo와 Finke(2001) 등은 multi-facility, multi-product, multi-period인 production-distribution문제를 network flow problem로 modeling하여 연구를 수행하였다.

Burn(1985) 등은 simplified manufacturing system에서의 유지비용, 생산비용, 수송비용을 최소화하기 위한 완제품의 선적에 관한 연구를 수행하였다. Williams(1981)는 combined assembly-arborescence network를 이용하여 기간에 대한 평균재고유지비용과 평균고정비용의 합을 최소화하기 위해 batch size를 결정하는 joint production/distribution scheduling에서의 heuristic 알고리즘을 개발하였다. Klingman(1988) 등은 화학공장을 대상으로 multiple time period, multiple commodity에 기초한 수학적 모형을 이용한 최적화문제를 연구를 수행하였다. Cohen(1988) 등은 multi stage production/distribution system에서 stochastic demand에 관한 연구를 수행하였다. Zuo(1991) 등은 large scale agricultural production and distribution system에서 production plant에 product를 할당하는 heuristic모델에 대한 연구를 수행하였다. Lee와 Billington(1993)은 인접 시설간에 자재흐름을 관리하는 heuristic 알고리즘을 개발하는 연구를 하였다.

본 연구에서는 multi-facility, multi-product인 생산-분배모델에 대해 운송시간의 제한, factory에서의 재고를 보유할 수 없다는 것과 같은 제한조건이 있는 상황에서의 재고비용, 생산비용, 운송비용을 최소화 하는 수학적 모형을 개발에 대한 연구를 수행한다.

지역적으로 분산되어 있는 factory에서 customer의 소요량에 따라 factory에서 customer까지의 수송시간의 제약, factory에서의 재고를 보유할 수 없다는 조건과 같은 제한조건이 있는 경우를 고려하여 제품의 생산을 담당할 factory를 선정하고 할당된 제품에 대하여 각 factory에서의 생산량을 할당하여 재고비용, 생산비용, 운송비용을 최소화하기 위한 최적생산-분배 모형을 제시한다.

3. 연구모형

3.1 생산분배 모형

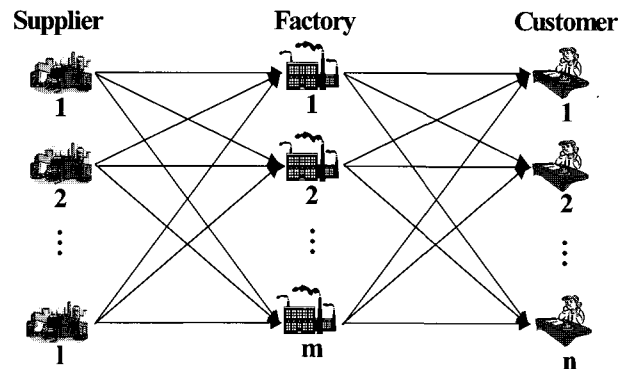
본 연구의 대상으로 하고 있는 생산-분배네트워크모델은 레미콘업체를 대상으로 한 것으로 제품생산을 위해 4가지의 원재료가 필요하고 원재료 각각은 각기 다른 supplier에서 공급 받고 있다. 생산에 필요한 원재료는 해당공장에 근접한 지역의 supplier를 선정하여 공급 받는다. Factory에서 생산하는 제품으로는 4종이 있다. Supplier에서 factory로 또한 factory에서 customer로의 운반수단의 용량에는 제한이 없다고 가정한다.

레미콘 제품의 특성상 factory는 대부분의 대도시를 거점으로 건립되어 위치하고 있으며 해당지역의 supplier에서 공급 받은 원재료를 factory에서 혼합하여 반제품의 형태로 운반수단을 통해 customer로 수송되어 customer에서 경화되어 완제품이 되는 특성이 있다.

다음은 본 연구에서 고려하여 할 주요 특성에 대하여 설명한다.

- (1) Factory의 생산량은 customer의 소요량에 의해 결정된다.
- (2) Supplier는 공급능력에 제약이 없다.
- (3) Factory에서는 생산능력의 제약이 있다.
- (4) Factory에서는 제품의 재고를 보유할 수 없다.
- (5) Factory의 원재료는 1일분만 저장한다.
- (6) Factory에서 customer까지 수송시간 제약이 있다.
- (7) 다품종 대량생산방식을 취한다.
- (8) 운송수단의 용량제약은 없다.

<그림 1>은 본 연구대상이 되는 공급사슬네트워크의 supplier, factory, customer 사이의 연결 관계를 표현한 것이다.



<그림 1> 본 연구대상의 네트워크모델

본 연구는 대상시스템의 특징으로 인해 고려해야 하는 제약조건을 적용하여 공급사슬 관리에서의 재고비용, 생산비용, 운송비용을 최소화 하는 최적생산-분배 방법을 결정하는 하기 위한 수학적 모형을 개발하였다.

개발한 수학적모형의 최적생산-분배방법을 결정하기 위한 결정요소는 다음과 같다.

- ① Customer에서의 소요량을 바탕으로 제품에 따른 해당지역supplier에서의 원자재 공급량 결정
- ② 제품에 따른 제품운송거리를 고려한 해당지역의 각 factory에서의 생산능력을 고려한 factory의 결정
- ③ 해당지역 각 factory에 제품별 생산량할당

3.2 최적화모형

수학적 모형은 효과적인 비용분석을 위해 전체공급 사슬을 다음과 같이 설계하였다. 다음은 개발된 수학적 모형을 위한 index와 parameter의 소개와 수립한 목적식과 제약식에 대해 소개한다.

3.2.1 Notation

Indices

- i : source
- p : product
- s : supplier
- f : factory
- c : customer

Parameters

- Pis : supplier s 에서 source i 단위당 생산량
- CPis : supplier s 에서 source i 단위당 생산비
- Ss : supplier s 에서의 고정비
- Sf : factory f 에서의 고정비
- Mis : supplier s 에서 source i 의 배합비
- tisf : source i를 supplier s에서 factory f 로 운송량
- tpfc : product p를 factory f에서 customer c로 운송량
- Ctisf : source i를 supplier s 에서 factory f로의 단위 당 운송비
- Ctpfc : product p 를 factory f 에서 customer c 로의 단위당 운송비
- Dpc : product p를 factory f에서 customer c 의 수요량
- Kf : factory f 의 생산능력
- Yfc : 이진변수 {0,1}, customer c 가 factory f에서 제품을 받으면 1, 아니면 0
- Y : Yfc 가 1인 값들의 집합
- C : factory f 에서 customer c 로 운반할 수 있는 최장거리

Dfc : factory f 에서 customer c 까지의 거리

3.2.2 Mathematical Model

$$Min Z = \sum_s S_s + \sum_i \sum_s CP_{is} \times P_{is} + \sum_f (S_f + \sum_c (t_{pfc} \times CT_{pfc} \times y_{fc})) + \sum_i \sum_s \sum_f CT_{isf} \times t_{isf} + \sum_p \sum_f \sum_c CT_{pfc} \times t_{pfc}$$

s.t

$$P_{is} = \sum_f t_{isf} \quad \forall i, s \tag{1}$$

$$\sum_i M_{is} = 1 \quad \forall s \tag{2}$$

$$\sum_p \sum_c t_{pfc} \leq k_f \quad \forall f \tag{3}$$

$$\sum_f t_{pfc} = d_{pc} \quad \forall c, p \tag{4}$$

$$y_{fc} \times D_{fc} = C \quad (y_{fc} \in Z) \tag{5}$$

$$y_{fc} \in 0, 1 \quad \forall c, f \tag{6}$$

$$\sum_i M_{is} \times P_{is} = t_{isf} \quad \forall c, f, p, s \tag{7}$$

$$\sum_s t_{isf} - \sum_c t_{pfc} = 0 \quad \forall i, f, p \tag{8}$$

$$t_{isf}, p_{is}, M_{is} \geq 0 \quad \forall i, f, s \tag{9}$$

$$t_{pfc}, d_{pc}, k_f, d_{fc}, D_{fc}, C \geq 0 \quad \forall c, f, p \tag{10}$$

본 수학적모형의 목적식은 재고비, 생산비, 운송비의 합을 최소화 하는 식이다.

제약식 (1)은 time t에 supplier s에서의 제품 i 재고량과 관계된 식이다. 즉, 전일재고, 금일 생산량, 금일 운송량과 현재재고량의 관계를 나타내는 식이다. 제약식 (2)는 이진변수로 제품에 따른 원재료를 공급하는 supplier가 할당되었는지를 보여준다.

제약식 (3)은 factory에서 customer로의 제품 운송이 factory의 저장능력이내 이어야 한다는 조건이다. 제약식 (4)는 supplier에서 factory로의 원자재 운송량이 factory의 저장능력이내 이어야 한다는 조건이다. 제약식 (5)는 customer의 제품에 대한 소요량이 해당 지역의 각 factory에서의 운송량의 합과 같아야 한다는 조건이다. 제약식 (6)은 이진변수로 customer가 어떤 factory에서 제품을 할당 받았는지를 보여준다. 제약식 (7)은 이진변수로 제품을 생산할 factory가 할당되었는지를 보여준다.

제약식 (8)은 factory에서 customer로의 운송거리가 최장운송거리 C 이내이어야 한다는 조건이다.

제약식 (9)는 재고량과 생산량은 비음조건을 만족해야 한다는 것을 보여준다. 제약식 (10)은 factory에서

customer로의 운송량이 비음조건을 만족해야 한다는 것을 보여준다.

수립된 수학적 모형은 제품의 특성상 운송시간의 제약과 재고를 보유할 수 없다는 제약 그리고 혼합비에 의해 제품을 생산하는 특징을 가진 통합공급사슬에 대하여 재고비용, 생산비용, 수송비용을 최소화할 수 있는 최적생산-분배모형으로 기존의 선행연구와 차별성을 가지게 된다.

4. 실험 및 결과분석

4.1 실험데이터

본 연구의 개발한 수학적 모형의 유효성을 평가하기 위하여 Microsoft의 Excel의 Solver를 이용하여 실험을 하였다. 실험을 위한 네트워크의 구성은 각 4개의 supplier, factory, customer 와 product의 1 period의 수요량 데이터를 이용하여 실험하였다.

본 연구의 실험을 위한 기초데이터는 현재 레미콘을 생산하는 업체를 대상으로 수집한 데이터이다. 레미콘 업체의 특성상 원재료 생산지와 각 지역에 흩어져 있는 수요처 그리고 생산기지로 구성되며 해당업체의 1년치 수요 및 공급량등 데이터를 수집하여 분석하고 정리한 것이다. <표 1>은 기간별 product에 대한 customer의 수요량을 나타낸다. 또한 <표 2>는 실험을 위한 factory 별 product별 단위당 생산비용을 나타낸 것이다.

<표 1> Customer별 제품 수요량

	고객1	고객2	고객3	고객4
제품1	1,085	790	1,896	1,919
제품2	15,972	14,968	23,597	23,069
제품3	695,843	741,598	596,842	887,110
제품4	39,584	56,842	37,458	54,564
합계	689,542	856,349	769,584	877,662

<표 2> Product별 제품별 단위당 생산비

	공장1	공장2	공장3	공장4
제품1	3,000	2,000	4,000	5,000
제품2	2,000	3,000	3,000	4,000
제품3	3,000	4,000	2,000	5,000
제품4	4,000	3,000	4,000	6,000

제품의 특성상 혼합비의 차로 제품을 구분하는 하는 특징이 있는 산업이다. 수집된 제품별 원재료 혼합비율은 <표 3>과 같다.

<표 3> Product별 원재료 혼합비율

	원재료1	원재료2	원재료3	원재료4
제품1	0.24	0.59	0.05	0.12
제품2	0.2	0.63	0.12	0.05
제품3	0.18	0.57	0.09	0.16
제품4	0.32	0.46	0.06	0.16

실험을 위한 supplier에서 factory까지의 수송거리는 <표 4>와 같다.

<표 4> Supplier에서 factory까지 수송거리

	공장1	공장2	공장3	공장4
supplier1	80	60	90	70
supplier2	80	100	100	80
supplier3	50	80	70	90
supplier4	80	70	100	120

실험을 위한 factory에서 고객까지의 수송거리는 <표 5>와 같다.

<표 5> Factory에서 customer까지 수송거리

	고객1	고객2	고객3	고객4
공장1	110	50	90	70
공장2	80	120	80	100
공장3	60	75	100	45
공장4	100	90	50	80

4.2 실험 결과 및 분석

실험을 위하여 각 공장의 생산능력은 10,500 ton으로 동일한 것으로 간주하였으며 supplier의 고정비는 30,000,000원 factory에서의 고정비는 10,000,000원 supplier에서 factory로 그리고 factory에서 customer로의 단위당 운송비용은 km당 100원으로 하여 실험을 실시하였다.

실험 결과 제품에 대한 고객으로의 공장별 원자재 공급량은 <표 6>과 같으며 제품에 대하여 factory에서 customer까지의 제품운송량은 <표 7>과 같이 결정되었다.

<표 6> 제품에 대한 공장별 원자재 공급량

	공장1	공장2	공장3	공장4	
P1	고객1	650	260	-	455
	고객2	1,598	640	-	1,119
	고객3	135	54	-	95
	고객4	325	130	-	228
P2	고객1	7,607	3,194	-	4,719
	고객2	23,963	10,062	-	14,866
	고객3	4,564	1,917	-	2,832
	고객4	1,902	799	-	1,180
P3	고객1	-	122,930	234,000	168,921
	고객2	-	389,278	741,000	534,917
	고객3	-	61,465	117,000	84,461
	고객4	-	109,271	208,000	150,152
P4	고객1	48,317	-	-	11,987
	고객2	69,455	-	-	17,231
	고객3	9,059	-	-	2,247
	고객4	24,158	-	-	5,993

<표 7> 제품의 공장에서 고객까지 운송량

	고객1	고객2	고객3	고객4	
P1	공장1	-	790	-	1,919
	공장2	1,085	-	-	-
	공장3	-	-	-	-
	공장4	-	-	1,896	-
P2	공장1	-	14,968	-	23,069
	공장2	15,972	-	-	-
	공장3	-	-	-	-
	공장4	-	-	23,597	-
P3	공장1	-	-	-	-
	공장2	682,943	-	-	-
	공장3	12,900	399,990	-	887,110
	공장4	-	341,608	596,842	-
P4	공장1	39,584	56,842	-	54,564
	공장2	-	-	-	-
	공장3	-	-	-	-
	공장4	-	-	37,458	-

본 연구는 복수의 제약조건과 혼합비에 의해 제품을 생산하는 특성을 가진 공급사슬전체에 대한 연구이다.

기존의 많은 연구들이 제약이 있는 상황에서 생산설비나 창고 등에서의 생산량 또는 운송량에 대한 최적화에 대한 연구이거나 통합공급사슬에서의 생산량이나 운송량 등 만을 결정하는 연구로 본 연구와 동일한 특성을 가진 연구가 존재하지 않는다.

따라서 실험결과의 유효성을 평가하기 위하여 본 연구에서는 해당업체의 1년전 생산현황 데이터를 근거로 실험을 수행하여 산출된 데이터가 적용전 데이터이다.

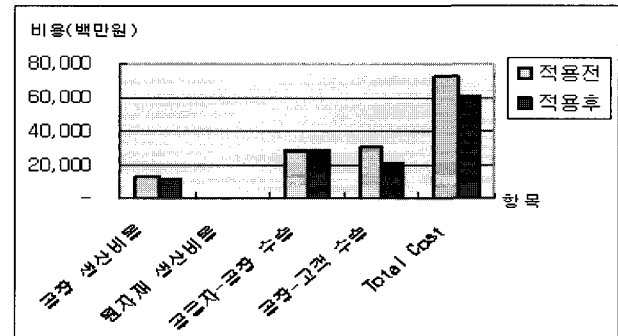
또한 개발된 모형에 동일한 수요데이터를 적용하여

산출된 결과가 적용후 데이터이다. 다음 <표 8>은 실험결과를 비교하기 위하여 정리한 것이다.

<표 8> 실험결과 비교

	적용전	적용후
공장	12,735,099,000	11,090,885,000
생산비용		
원자재	610,853,601	610,853,601
생산비용		
supplier-공	28,137,012,850	28,489,572,430
장수송비용		
공장-고객수	30,819,787,500	20,398,045,000
송비용		
supplier고정	76,000,000	76,000,000
비용		
공장고정비	31,000,000	31,000,000
용		
Total Cost	72,409,752,951	60,696,356,031

다음 <그림 2>는 수학적 모델 적용전과 적용후 공급사슬관련비용을 chart로 표현한 그림이다.



<그림 2> 실험결과 비교 chart

실험의 결과를 정리하여 보면 현재 대상업체가 운영 중인 현황을 동일하게 반영하여 개발된 수학적모형의 적용전과 적용후 결과를 설명하면 다음과 같다. 본 연구에서 제안한 모형을 적용하여 산출된 비용은 대상모델의 특성상 재고를 보유하지 않고 수요량만큼만 생산하고 원재료의 혼합에 의해 제품을 생산하는 데 소요되는 제품생산비용에 있어서 11.4% 감소하였다. 또한 제품이 시간이 지남에 따라 경화되는 특성을 가져 운송시간의 제약이 따르는 상황을 고려한 factory에서 customer로의 운송비용은 51.0%가 감소하였음을 알 수 있다. 공급사슬네트워크전체의 관련 제비용을 합산한 총비용에서는 현상황대비 모델 적용후가 적용전에 비하여 비용면에서 19.3% 감소하였음을 알 수 있다.

5. 결 론

시장경쟁이 치열해짐에 따라 생산-분배네트워크의 설계와 구축 그리고 이를 효율적으로 운용하기 위한 여러 방법이 연구되고 있다.

본 연구는 다품종의 제품이 factory에서 customer로의 수송시간의 제약과 factory에서의 제품에 대한 재고를 보유할 수 없다는 제약과 같은 제한조건이 있는 경우에서의 최적생산-분배결정에 관한 연구이다. 최적생산-분배방법 결정을 위해 customer의 소요량에 따른 factory의 선정과 제품에 따른 factory에서의 생산량 할당하는 수학적모형의 개발하였다. 개발된 수학적 모형은 효과적인 비용분석을 위해 전체공급사슬에 대하여 목적식과 제약식을 수립하였고 이를 통하여 전체공급사슬에서의 재고비용, 생산비용, 운송비용을 최소화할 수 있는 모형이다.

본 연구에서 제안한 수학적 모형의 타당성의 평가를 위해 상업적인 검증도구인 Excel Solver를 이용하여 실험을 수행하였다. 실험한 결과 본 연구에서 제안한 수학적 모형이 고객의 수요를 바탕으로 한 생산-분배 공급사슬 설계에 유효한 결과를 도출함을 알 수 있었다.

본 연구를 바탕으로 기업의 공급사슬에 제한조건이 있는 특수한 상황이 존재하는 경우 최적 공급-분배모형의 개발을 손쉽게 수행 평가함으로써 비용면에서 경쟁력을 확보할 수 있으며 동시에 납기준수등 고객서비스의 향상을 도모할 수 있을 것이다.

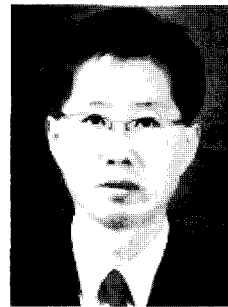
향후 연구과제로는 본 연구의 결과를 실제현장에 적용할 예정이며 계절적 수요변동과 multi period를 고려하는 등 실제 상황을 반영한 최적 생산-분배결정방법에 대한 연구의 확장과 재고와 외주생산을 고려한 연구도 수행하여야 할 것이다.

6. 참 고 문 헌

- [1] Burns, L., Hall, W., Blumenfeld, D and Dazango., C Distribution strategies that minimize transportation and inventory costs. *Operations Research*, 33(3), 469-490, 1985.
- [2] Chandra, P. and Fisher, M., Coordination of production and distribution planning, *European Journal of Operational Research*, 72, 503-517, 1994.
- [3] Cohen, M and Lee, H., Strategic analysis of integrated production-distribution systems: models and methods. *Operations Research*, 36, 216-228, 1988.
- [4] Erenguc, S, S., Simpson, N. and Vakharia, A, J., Integrated production/distribution planning in supply chains: An invited review, *European Journal Of Operational Research*, 115, 219-236, 1999.
- [5] Flipo, C-D., Finke, G., An integrated model for an industrial production-distribution problem, *IIE Transactions*, 33, 705-715, 2001.
- [6] Klingman, D., More, J. and Phillips, N., A logistics planning system at W. R Grace. *Operations Research*, 36, 811-822, 1988.
- [7] Lee, H. L., Billington, C., Material management in decentralized supply Chains, *Operations Research*, 41(5), 835-847, 1993.
- [8] Thomas, Griffin., Coordinated Supply Chain Management, *European Journal of Operational Research*, 94, 1-15, 1996.
- [9] Williams, j., Heuristic techniques for simultaneous scheduling of production and distribution in multi-echelon structures : theory and empirical comparisons. *Management Science*, 27, 336-351, 1981.
- [10] Zou, M, Kuo, W. and McOrberts, K., Application of mathematical programming to a large-scale agricultural production and distribution system. *Journal of the Operational Research Society*, 42(8), 639-648, 1991.

저 자 소 개

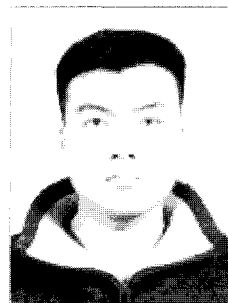
임 석 진



연세대학교 산업시스템경영과 공학박사, 한국과학기술연구원 Post-Doc, 인덕대학 산업시스템경영과 재직중.

주소 : 서울특별시 노원구 초안산길 14

정 석 재



연세대학교 정보산업공학과 석사학위 취득후 현재연세대학교 정보산업공학과 박사과정 재학중, 관심분야는 SCM, 메타휴리스틱등이다.

주소 : 서울특별시 서대문구 신촌동 134